

# APLICACIÓN DE UNA METODOLOGÍA DE SELECCIÓN DE BUCLES Y AJUSTE DE CONTROLADORES MEDIANTE OPTIMIZACIÓN MULTI OBJETIVO

Víctor Huilcapi

Universidad Politécnica Salesiana, Guayaquil, Ecuador, vhuilcapi@ups.edu.ec

Xavier Blasco - Juan M. Herrero - Alberto Pajares

Universitat Politècnica de València, España, xblasco@isa.upv.es; juaherdu@isa.upv.es; alpafer1@upv.es

## Resumen

*En este artículo se presenta la aplicación de una metodología de selección de lazos de control y ajuste de controladores para controlar un sistema multivariable no lineal denominado unidad caldera-turbina. Se plantearon dos escenarios y se definieron dos conceptos de diseño (combinaciones de lazos de control), cada uno con seis objetivos. Se muestra como la metodología permite establecer un marco de comparación global de cada concepto de diseño y ofrece información detallada a un diseñador para que de acuerdo con sus preferencias pueda seleccionar una solución adecuada para controlar el sistema bajo estudio.*

**Palabras clave:** Sistemas de control multivariable, sistemas no lineales, lazos de control, optimización evolutiva multiobjetivo.

## 1 Introducción

Los sistemas con múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO) demandan cada vez exigencias más altas para su control. Para controlar este tipo de sistemas existen dos grandes enfoques, control centralizado [6], y control descentralizado [2], [22]. En un esquema de control descentralizado se tienen varios controladores independientes, y se establecen lazos de control entre sus variables de entrada y salida. Esto tiene una ventaja implícita ya que por ejemplo en caso de mantenimiento o fallo de algún lazo de control es posible aislarlo sin dejar toda la planta fuera de servicio [15], [21]. Así también debido a que existen técnicas sencillas para sintonizarlos, los controladores descentralizados son de amplio uso [16].

En los esquemas de control descentralizados clásicos (como por ejemplo RGA [5]), se requiere generalmente medir las interacciones que ocurren entre las variables de entrada y salida del sistema para establecer lazos de control de forma conveniente. Es importante mencionar que las metodologías tradicionales de selección de lazos de control pueden sugerir diferentes combinaciones de lazos de control para un mismo sis-

tema. Además analizan la selección de lazos de control independientemente del ajuste de los controladores del sistema.

Los aspectos mencionados anteriormente indican que el problema de seleccionar adecuadamente lazos de control en sistemas multivariables es una tarea no trivial y compleja [14]. Debido al conflicto de resultados que ofrecen las metodologías tradicionales de selección de lazos de control es recomendable abordar esta problemática desde un enfoque de optimización multiobjetivo. Los enfoques de diseño basados en optimización multiobjetivo permiten analizar problemas que tienen objetivos de diseño en conflicto. Estos enfoques se han aplicado satisfactoriamente al modelado y control de sistemas como por ejemplo en [12], [13].

En este artículo se muestra una metodología que aplica un enfoque de optimización multiobjetivo para realizar un control descentralizado de sistemas multivariables [10], [11], [14]. La metodología fusiona tanto la selección de lazos de control como el ajuste de los controladores en lo que se denomina un *concepto de diseño*. Está formada por tres etapas, en la primera se plantea cada problema multiobjetivo (MOP) y se establecen los *conceptos de diseño*. La segunda etapa corresponde al proceso de optimización, aquí se usó para encontrar los frentes de Pareto el algoritmo evolutivo multiobjetivo *ev-MOGA* [9],[17], (sin embargo la metodología puede ser aplicada con diferentes algoritmos de optimización). La tercera etapa corresponde al análisis y visualización de los frentes de Pareto para la toma de decisiones. En esta etapa se usó la herramienta de visualización de frentes de Pareto multidimensionales denominado *level diagrams* (LD) [3], [4].

Este artículo está estructurado de la siguiente manera: la sección 2 describe la metodología de selección de lazos de control y ajuste de controladores. En la sección 3 se muestra la aplicación de esta metodología sobre el sistema multivariable no lineal denominado unidad caldera-turbina. En la sección 4 se muestran los resultados obtenidos y se realiza una discusión de los mismos. Finalmente algunas conclusiones se muestran en la sección 5.

## 2 Metodología multiobjetivo para el control de sistemas multivariables

Dado un sistema con  $n$  entradas  $(u_1, \dots, u_n)$  y  $n$  salidas  $(y_1, \dots, y_n)$ , como se muestra en la ecuación (1).

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x, u) \\ y &= h(x, u) \end{aligned} \tag{1}$$

Donde  $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_m) \in \mathbf{R}^m$  representa el vector de estado,  $\mathbf{u}_i, \mathbf{y}_i \in \mathbf{R}^n$  son los vectores con las entradas y salidas del sistema. El control multivariable descentralizado para el sistema descrito en (1) (la metodología es aplicable para otras formas de representación de un sistema multivariable mientras pueda ser simulado) en una determinada zona de operación está definido por:

- Un vector  $\mathbf{c}_k$  cuyos elementos representan los controladores para estabilizar las salidas del sistema como se muestra en (2). El vector  $\mathbf{c}_k$  representa una alternativa al control del sistema, lo que se denomina un *concepto de diseño*.
- Una matriz de selección de lazos de control  $L_p^{c_k}$  que conecta las salidas  $\hat{u}_i$  de cada controlador con las entradas  $u_i$  del sistema MIMO como se muestra en (3).

$$\mathbf{c}_k = [C_{y_1, \hat{u}_1}^{c_k}, \dots, C_{y_i, \hat{u}_i}^{c_k}, \dots, C_{y_n, \hat{u}_n}^{c_k}] \tag{2}$$

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ \vdots \\ u_i \\ \vdots \\ u_n \end{bmatrix} = L_p^{c_k} \cdot \begin{bmatrix} \hat{u}_1 \\ \vdots \\ \hat{u}_i \\ \vdots \\ \hat{u}_n \end{bmatrix} \tag{3}$$

$$k \in \{1, \dots, w\}; k, w \in \mathbf{Z}^+$$

El elemento  $C_{y_i, \hat{u}_i}^{c_k}$  en la ecuación (2) representa el controlador de la salida  $y_i$  del vector de control  $\mathbf{c}_k$  (el superíndice  $c_k$  está asociado a cada concepto de diseño  $\mathbf{c}_k$ , por ejemplo para  $\mathbf{c}_1$  se asocia  $c_1$ ). Por lo cual el controlador  $C_{y_i, \hat{u}_i}^{c_k}$  genera la salida  $\hat{u}_i$  la cual se conecta con la entrada  $u_i$  del sistema multivariable usando la matriz de selección de lazos de control  $L_p^{c_k}$  como se muestra en la figura 1.  $L_p^{c_k}$  es una matriz Booleana como se muestra en (4). La matriz  $L_p^{c_k}$  está formada únicamente por un valor lógico 1 en cada una de sus filas o columnas como se muestra en (4).

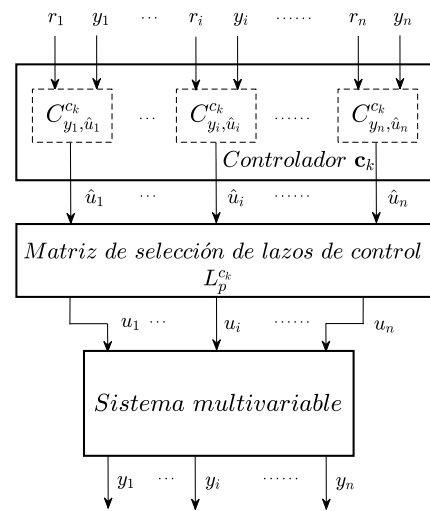


Figura 1: Diagrama de bloques del sistema de control multivariable descentralizado definido en (2) y (3).

$$L_p^{c_k} = \begin{bmatrix} l_{11} & \dots & l_{1n} \\ \vdots & \dots & \vdots \\ l_{n1} & \dots & l_{nn} \end{bmatrix}; l_{ij} = 0, 1; \forall i, j = 1 \dots n \tag{4}$$

Para cada fila,  $\sum_{i=1}^n (l_{ij}) = 1$

Para cada columna,  $\sum_{j=1}^n (l_{ij}) = 1$

Cada controlador  $C_{y_i, \hat{u}_i}^{c_k}$  se ajusta de forma óptima a través de un vector de parámetros  $\mathbf{x}^{c_k}$  y teniendo en consideración la combinación de lazos de control de acuerdo con  $L_p^{c_k}$ . Por lo tanto, el control del proceso se parametriza por el vector que se muestra en (8). Para cada concepto de diseño, se plantean MOPs como se muestra en (5)-(7).

$$\mathbf{X}^{c_k} = \arg \min_{\mathbf{x}^{c_k}} \mathbf{J}(\mathbf{x}^{c_k}) \tag{5}$$

$$\mathbf{J}(\mathbf{x}^{c_k}) = [J_1(\mathbf{x}^{c_k}), \dots, J_s(\mathbf{x}^{c_k})] \tag{6}$$

$$\underline{\mathbf{x}}^{c_k} \leq \mathbf{x}^{c_k} \leq \overline{\mathbf{x}}^{c_k} \tag{7}$$

Donde,  $\underline{\mathbf{x}}^{c_k}$  y  $\overline{\mathbf{x}}^{c_k}$  representan los límites superiores e inferiores del espacio de búsqueda del vector de parámetros  $\mathbf{x}^{c_k}$  para el concepto de diseño  $\mathbf{c}_k$ .

$$\mathbf{x}^{c_k} = [\mathbf{x}_{y_1}^{c_k}, \dots, \mathbf{x}_{y_n}^{c_k}] \tag{8}$$

Al aplicar la metodología se genera para cada concepto de diseño un conjunto de soluciones óptimas de Pareto  $\mathbf{X}^{c_k}$  y los correspondientes frentes de

Pareto  $\mathbf{J}(\mathbf{X}^{ck})$ . Finalmente se comparan los frentes de Pareto obtenidos para cada MOP (que corresponden a distintos lazos de control, cada uno con una estructura de control). La metodología se resume en la tabla 1 (se pueden encontrar todos los detalles en [14]).

Tabla 1: Metodología multiobjetivo para ajustar las estructuras de control en sistemas MIMO.

<p><b>ETAPA A: Definición del problema</b>                  1: Definir el escenario                  Objetivos <math>\mathbf{J}(\mathbf{x}^{ck}) = [J_1(\mathbf{x}^{ck}), \dots, J_s(\mathbf{x}^{ck})]</math>                  Conjunto de restricciones sobre <math>\mathbf{J}(\mathbf{x}^{ck})</math>                  2: Definir conceptos de diseño a considerar <math>\{c_1, \dots, c_k\}</math>                  3: Plantear MOPs <math>MOP_{c_1}, MOP_{c_2}, \dots, MOP_{c_k}</math>  <b>ETAPA B: Optimización multiobjetivo</b>                  Optimizar cada <math>MOP_{c_k}</math> para obtener:                  4: Los frentes de Pareto <math>\mathbf{J}(\mathbf{X}_p^{*ck})</math>                  5: Los conjuntos de Pareto para cada concepto <math>\mathbf{X}_p^{*ck}</math>  <b>ETAPA C: Toma de decisiones</b>                  6. Compara conceptos de diseño <math>\mathbf{J}(\mathbf{X}_p^{*ck}), \mathbf{X}_p^{*ck}</math>                  7. Usando preferencias selecciona los controladores para el sistema MIMO                  ¿El procedimiento y los controladores son satisfactorios?                  Si, entonces finaliza el procedimiento                  No, puede regresar a la etapa A y considerar agregar nuevos conceptos y/o nuevos objetivos de diseño.</p>
---

### 3 Ejemplo de aplicación

En esta sección se aplica la metodología mostrada en este artículo (ver tabla 1) a un sistema multivariable no lineal denominado unidad caldera-turbina [1]. El sistema propuesto en [1] presenta tres entradas  $u_1, u_2, u_3$  y tres salidas  $y_1, y_2, y_3$  y se usó para la generación de energía eléctrica.

La dinámica del sistema fue modelada en [1], y se fundamentó en el grupo caldera-turbina P16/G16 de la planta Sydvenska Kraft AB en Malmö, Suecia [7], [8]. El modelo en primeros principios del sistema se muestra en las ecuaciones (9)-(13).

$$\dot{x}_1 = -0.0018u_2x_1^{9/8} + 0.9u_1 - 0.15u_3 \quad (9)$$

$$\dot{x}_2 = (0.073u_2 - 0.016)x_1^{9/8} - 0.1x_2 \quad (10)$$

$$\dot{x}_3 = (141u_3 - (1.1u_2 - 0.19)x_1)/85 \quad (11)$$

$$y_1 = x_1; y_2 = x_2 \quad (12)$$

$$y_3 = 0.05(0.13073x_3 + 100a_{cs} + q_e/9 - 67.975) \quad (13)$$

Donde:  $x_1, x_2$ , y  $x_3$  son las variables de estado del sistema y representan;  $x_1$ : presión de la caldera [ $Kg/cm^2$ ];  $x_2$ : potencia eléctrica de salida [ $MW$ ];  $x_3$ : densidad del fluido [ $Kg/m^3$ ].

Las entradas se denotan por  $u_1, u_2$ , y  $u_3$  y representan;  $u_1$ : posición de la válvula para el flujo de combustible;  $u_2$ : posición de la válvula para el control del vapor;  $u_3$ : posición de la válvula para el control de flujo de agua de alimentación.

La salida  $y_1$  representa la presión de la caldera en [ $Kg/cm^2$ ];  $y_2$  es la potencia eléctrica de salida en [ $MW$ ]; y la salida  $y_3$  representa el nivel del agua en el colector de la caldera en [ $m$ ] con respecto del nivel de referencia para el punto de operación nominal del sistema. La salida  $y_3$  puede ser tanto positiva como negativa y depende de  $a_{cs}$  y  $q_e$  que representan la calidad del vapor y la tasa de evaporación en [ $Kg/s$ ] respectivamente y se detallan en las ecuaciones (14), (15).

$$a_{cs} = \frac{(1 - 0.001538x_3)(0.8x_1 - 25.6)}{x_3(1.0394 - 0.0012304x_1)} \quad (14)$$

$$q_e = (0.854u_2 - 0.147)x_1 + 45.59u_1 - 2.514u_3 - 2.096 \quad (15)$$

Los actuadores del sistema presentan restricciones como se detalla en [1]. Algunos puntos de operación ( $\wp$ ) del sistema descrito en [1] son propuestos en [18], [20] y se muestran en la tabla 2.

Tabla 2: Puntos de operación de la unidad caldera-turbina.

$\wp$	$\wp_1$	$\wp_2$	$\wp_3$	$\wp_4$	$\wp_5$	$\wp_6$	$\wp_7$
$x_1^0$	75.60	86.40	97.20	108	118.8	129.6	140.4
$x_2^0$	15.27	36.65	50.52	66.65	85.06	105.8	128.9
$x_3^0$	299.6	324.4	385.2	428	470.8	513.6	556.4
$u_1^0$	0.156	0.209	0.271	0.34	0.418	0.505	0.6
$u_2^0$	0.483	0.552	0.621	0.69	0.759	0.828	0.897
$u_3^0$	0.183	0.256	0.340	0.433	0.543	0.663	0.793
$y_3^0$	-0.97	-0.65	-0.32	0	0.32	0.64	0.98

El punto de operación nominal del sistema es usualmente el punto  $\wp_4$  (de acuerdo con [1], [20]). Si se linealiza el sistema en este punto de operación se obtiene la planta propuesta en [8], que se muestra en la ecuación (16).

$$G(s) = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} & G_{13} \\ G_{21} & G_{22} & G_{23} \\ G_{31} & G_{32} & G_{33} \end{bmatrix} \quad (16)$$

Donde:

$$G_{11} = \frac{0.9}{s + 0.002509} \quad (17)$$

$$G_{12} = \frac{-0.34904}{s + 0.002509} \quad (18)$$

$$G_{13} = \frac{-0.15}{s + 0.002509} \quad (19)$$

$$G_{21} = \frac{-1.3878 \cdot 10^{-17}(s - 4.502 \cdot 10^{15})}{(s + 0.002509)(s + 0.1)} \quad (20)$$

$$G_{22} = \frac{14.1555(s + 0.0007969)}{(s + 0.002509)(s + 0.1)} \quad (21)$$

$$G_{23} = \frac{-0.010414}{(s + 0.002509)(s + 0.1)} \quad (22)$$

$$G_{31} = \frac{0.25328(s - 0.003871)(s + 0.02892)}{(s + 0.002509)s} \quad (23)$$

$$G_{32} = \frac{0.5124(s - 0.01535)(s + 0.0007)}{(s + 0.002509)s} \quad (24)$$

$$G_{33} = \frac{-0.013967(s - 0.4918)(s + 0.003539)}{(s + 0.002509)s} \quad (25)$$

El cálculo de RGA del sistema de acuerdo con [8] se muestra en la ecuación (26). Se puede observar en (23)-(25) que la salida  $y_3$  tiene un polo en el origen ( $s = 0$ ), por lo cual el RGA calculado en [8] podría ser un poco ambiguo.

$$\Lambda = \begin{matrix} & u_1 & u_2 & u_3 \\ \begin{matrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{matrix} & \begin{pmatrix} 0.3119 & \mathbf{0.6824} & 0.0058 \\ \mathbf{0.9294} & 0.3176 & -0.2474 \\ -0.2413 & 0 & \mathbf{1.2413} \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (26)$$

De acuerdo con RGA la combinación de lazos entrada-salida sugerido para controlar el sistema de manera descentralizada es:  $y_1 - u_2; y_2 - u_1; y_3 - u_3$ . Analizando la ecuación (26) se puede ver que existen otras combinaciones de lazos de control que posibilitan controlar el sistema como por ejemplo  $y_1 - u_1; y_2 - u_2; y_3 - u_3$ .

De forma general la metodología mostrada puede ser aplicada directamente sobre sistemas multi-variables no lineales, aunque para delimitar el análisis del conjunto de posibles combinaciones de bucles de entrada-salida puede ser útil indagar inicialmente las ganancias relativas del sistema en cada punto de operación (calculando RGA o aplicando cualquier metodología clásica de selección de lazos de control). De esta forma se analizaría solo aquellos bucles de control en donde los elementos de RGA sean mayores que cero (que en principio son las combinaciones viables para controlar el sistema). Esto también reduce el número de MOP a analizar y por tanto el coste computacional de la metodología. Es válido mencionar que la selección de un bucle de control u otro puede estar influenciada por el punto de operación del sistema como se mostró en [11].

Para analizar detalladamente como seleccionar lazos entrada-salida óptimos para controlar el sistema propuesto en [1] y ajustar los controladores se aplica la metodología propuesta en [10], [11], [14].

Se analizan dos combinaciones de lazos de control para reducir el número de conceptos de diseño y el coste computacional de la metodología (sin embargo puede ser aplicada para analizar múltiples combinaciones de lazos de control).

Se establecen dos conceptos de diseño  $\mathbf{c}_1$  (lazos de control  $LP_1 : y_1 - u_2; y_2 - u_1; y_3 - u_3$ ); y  $\mathbf{c}_2$

(lazos de control  $LP_2 : y_1 - u_1; y_2 - u_2; y_3 - u_3$ ). Se usan controladores PIs de un grado de libertad con anti-windup como se muestra en (27)-(34).

$$\mathbf{c}_1 = [C_{y_1, \hat{u}_1}^{c_1}, C_{y_2, \hat{u}_2}^{c_1}, C_{y_3, \hat{u}_3}^{c_1}] \quad (27)$$

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{u}_1 \\ \hat{u}_2 \\ \hat{u}_3 \end{bmatrix} \quad (28)$$

$$C_{y_1, \hat{u}_1}^{c_1} = \frac{K_1^{c_1}(s + 1/T_i^{c_1})}{s} \quad (29)$$

$$C_{y_2, \hat{u}_2}^{c_1} = \frac{K_2^{c_1}(s + 1/T_i^{c_1})}{s}$$

$$C_{y_3, \hat{u}_3}^{c_1} = \frac{K_3^{c_1}(s + 1/T_i^{c_1})}{s}$$

$$\mathbf{x}^{c_1} = [K_1^{c_1}, T_i^{c_1}, K_2^{c_1}, T_i^{c_1}, K_3^{c_1}, T_i^{c_1}] \quad (30)$$

$$\mathbf{c}_2 = [C_{y_1, \hat{u}_1}^{c_2}, C_{y_2, \hat{u}_2}^{c_2}, C_{y_3, \hat{u}_3}^{c_2}] \quad (31)$$

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{u}_1 \\ \hat{u}_2 \\ \hat{u}_3 \end{bmatrix} \quad (32)$$

$$C_{y_1, \hat{u}_1}^{c_2} = \frac{K_1^{c_2}(s + 1/T_i^{c_2})}{s}$$

$$C_{y_2, \hat{u}_2}^{c_2} = \frac{K_2^{c_2}(s + 1/T_i^{c_2})}{s} \quad (33)$$

$$C_{y_3, \hat{u}_3}^{c_2} = \frac{K_3^{c_2}(s + 1/T_i^{c_2})}{s}$$

$$\mathbf{x}^{c_2} = [K_1^{c_2}, T_i^{c_2}, K_2^{c_2}, T_i^{c_2}, K_3^{c_2}, T_i^{c_2}] \quad (34)$$

Para cada concepto de diseño se plantea un MOP ( $k = 1$  para el concepto  $\mathbf{c}_1$ ; lazos  $LP_1$ , y  $k = 2$  para el concepto  $\mathbf{c}_2$ ; lazos  $LP_2$ ), donde cada MOP tiene seis objetivos de diseño. Tres objetivos se plantean para analizar el desempeño de cada una de las salidas ( $y_1, y_2, y_3$ ) aplicando el indicador IAE y los tres objetivos restantes analizan los esfuerzos de control del sistema ( $u_1, u_2, u_3$ ) aplicando el indicador IADU. De esta forma se evalúa el desempeño de cada salida del sistema de manera independiente, es decir, sin mezclar desempeños con esfuerzos de control del sistema, para evitar enmascarar información que podría ser importante para que un diseñador tome una decisión. Se plantea cada MOP como se detalla en las ecuaciones (35)-(41).

$$\min_{\mathbf{x}^{ck}} \mathbf{J}(\mathbf{x}^{ck}) \quad (35)$$

$$\mathbf{J}(\mathbf{x}^{ck}) = [J_1(\mathbf{x}^{ck}), J_2(\mathbf{x}^{ck}), J_3(\mathbf{x}^{ck}), J_4(\mathbf{x}^{ck}), J_5(\mathbf{x}^{ck}), J_6(\mathbf{x}^{ck})] \quad (36)$$

$$J_\eta(\mathbf{x}^{ck}) = \int_0^{t_f} |e_\eta| \Big|_{r_1=y_1^0+\Delta y_1}^{(r_2, r_3)=(y_2^0, y_3^0)} dt + \int_0^{t_f} |e_\eta| \Big|_{r_2=y_2^0+\Delta y_1}^{(r_1, r_3)=(y_1^0, y_3^0)} dt \quad (37)$$

$$J_{\eta+3}(\mathbf{x}^{ck}) = \int_0^{t_f} \left| \frac{du_\eta}{dt} \right|_{\substack{(r_2, r_3)=(y_2^0, y_3^0) \\ r_1=y_1^0+\Delta y_1}} dt + \int_0^{t_f} \left| \frac{du_\eta}{dt} \right|_{\substack{(r_1, r_3)=(y_1^0, y_3^0) \\ r_2=y_2^0+\Delta y_2}} dt \quad (38)$$

$\eta = 1 \text{ hasta } 3$   
 $t_f = 500 \text{ segundos}$   
 $\underline{\mathbf{x}}^{ck} \leq \mathbf{x}^{ck} \leq \overline{\mathbf{x}}^{ck}$  (39)

$$J_1(\mathbf{x}^{ck}) \leq 12 \cdot 10^4, J_2(\mathbf{x}^{ck}) \leq 2.5 \cdot 10^5$$

$$J_3(\mathbf{x}^{ck}) \leq 600, J_4(\mathbf{x}^{ck}) \leq 150, \quad (40)$$

$$J_5(\mathbf{x}^{ck}) \leq 50, J_6(\mathbf{x}^{ck}) \leq 200$$

$$\mathbf{x}^{ck} = [K_1^{ck}, Ti_1^{ck}, K_2^{ck}, Ti_2^{ck}, K_3^{ck}, Ti_3^{ck}] \quad (41)$$

Los límites del vector de decisión  $\mathbf{x}^{ck}$  se muestran en la tabla 3. Estos límites se establecieron tomando en consideración los controladores de referencia propuestos en [20]. Si no se dispone de experimentos previos, es posible ajustar un controlador de referencia usando alguna técnica de sintonización clásica. El objetivo de usar un controlador de referencia es acotar el espacio de búsqueda de soluciones del algoritmo *ev-MOGA* [9] y disminuir el coste computacional de la metodología.

Tabla 3: Límites de los vectores de decisión  $\mathbf{x}^{c1}$  y  $\mathbf{x}^{c2}$  para el ajuste de controladores del sistema caldera-turbina.

$\mathbf{x}^{c1}$	$K_1^{c1}$	$Ti_1^{c1}$	$K_2^{c1}$	$Ti_2^{c1}$	$K_3^{c1}$	$Ti_3^{c1}$
$\underline{\mathbf{x}}^{c1}$	0.001	10	0.001	5	5	15
$\overline{\mathbf{x}}^{c1}$	1	50	1	20	10	30
$\mathbf{x}^{c2}$	$K_1^{c2}$	$Ti_1^{c2}$	$K_2^{c2}$	$Ti_2^{c2}$	$K_3^{c2}$	$Ti_3^{c2}$
$\underline{\mathbf{x}}^{c2}$	0.001	40	-1	50	5	50
$\overline{\mathbf{x}}^{c2}$	1	60	0.1	70	10	150

### 4 Resultados y discusión

Luego de la optimización multiobjetivo de cada MOP se obtuvieron los frentes de Pareto que se muestran mediante LD en las figuras 2 y 3. En la figura 2 se aplicó la norma- $\infty$  para representar los frentes, ya que esta permite realizar un análisis de compensaciones entre los objetivos de diseño de cada MOP (un incremento en esta norma indica un degradamiento de al menos uno de los objetivos del MOP). Se puede observar en los objetivos  $J_1, J_2,$  y  $J_3$  de la figura 2 que el control  $LP_1$  tiene mejores prestaciones para seguimiento de referencias de las salidas  $y_1, y_2, y_3$  comparado con el control  $LP_2$  ya que  $LP_1$  cubre una región que  $LP_2$  no alcanza y que corresponde a los mejores desempeños para cada una de las salidas, especialmente para  $y_1$  y  $y_2$ . Esta región corresponde a:  $J_1(\mathbf{x}^{c1}) < 2557, J_2(\mathbf{x}^{c1}) < 9476, J_3(\mathbf{x}^{c1}) < 2.47.$

Con respecto a las acciones de control del sistema se puede observar en los objetivos  $J_4, J_5,$  y  $J_6$  de la figura 2 que el control  $LP_1$  consigue menores esfuerzos de control para controlar el sistema comparado con el control  $LP_2$ . En la figura 3 se muestra los frentes de Pareto de  $LP_1$  y  $LP_2$  aplicando la norma  $QI$  (detalles de la norma  $QI$  se muestran en [17], [19]). Es posible observar que el control  $LP_1$  tiene una región que domina al control  $LP_2$ , esta zona corresponde a las soluciones del frente de  $LP_1$  donde  $QI < 1$  (es decir, las soluciones que están bajo la unidad). Para analizar con mayor detalle el desempeño de  $LP_1$  y  $LP_2$  se seleccionó una solución en cada frente de Pareto. La solución  $PA$  del concepto de diseño  $LP_1$  y  $PB$  del concepto de diseño  $LP_2$ .

Se analizó el comportamiento del sistema cuando se mueve de su punto de operación nominal ( $\varphi_4$ ) a un punto de operación cercano. Para lo cual en  $t = 100$  s, la presión de la caldera  $y_1$  cambia de  $108 \text{ Kg/cm}^2$  hasta  $120 \text{ Kg/cm}^2$ , la potencia eléctrica de salida  $y_2$  de  $66.65 \text{ MW}$  a  $100 \text{ MW}$  y el nivel de agua en el colector de caldera  $y_3$  se mantiene en su valor nominal ( $0 \text{ m}$ ). Las respuestas del sistema se muestran en la figura 4. Aquí se puede observar que tanto el controlador  $PA$  como el  $PB$  estabilizan el sistema, pero está claro que el controlador en  $PA$  (control  $LP_1$ ) tiene un mejor desempeño que el controlador en  $PB$  (control  $LP_2$ ). Esto también se muestra en la tabla 4 (ver objetivos  $J_1, J_2, J_3$ ). Los esfuerzos de control del controlador  $PA$  son menos agresivos que los del  $PB$  (ver objetivos  $J_4, J_5, J_6$ )

Tabla 4: Parámetros y desempeños de controladores PIs seleccionados en las figuras 2 y 3.

Parámetros	$PB (PIs - LP_2)$	Parámetros	$PA (PIs - LP_1)$
$K_1^{c2}$	0.0236	$K_1^{c1}$	0.0382
$Ti_1^{c2}$	59.17	$Ti_1^{c1}$	49.42
$K_2^{c2}$	-0.01673	$K_2^{c1}$	0.00187
$Ti_2^{c2}$	59.98	$Ti_2^{c1}$	11.66
$K_3^{c2}$	7.31	$K_3^{c1}$	9.83
$Ti_3^{c2}$	145.35	$Ti_3^{c1}$	16.42
$J_1(\mathbf{x}^{c2})$	11913.2	$J_1(\mathbf{x}^{c1})$	<b>5618.2</b>
$J_2(\mathbf{x}^{c2})$	19357.5	$J_2(\mathbf{x}^{c1})$	<b>18719.3</b>
$J_3(\mathbf{x}^{c2})$	158.09	$J_3(\mathbf{x}^{c1})$	<b>41.76</b>
$J_4(\mathbf{x}^{c2})$	3.474	$J_4(\mathbf{x}^{c1})$	<b>1.103</b>
$J_5(\mathbf{x}^{c2})$	0.9462	$J_5(\mathbf{x}^{c1})$	<b>0.2999</b>
$J_6(\mathbf{x}^{c2})$	4.96	$J_6(\mathbf{x}^{c1})$	<b>2.30</b>

Para analizar el sistema en un punto de operación alejado del punto nominal de trabajo, se simula su comportamiento cuando en  $t = 100$  s,  $y_1$  cambia de  $108 \text{ Kg/cm}^2$  a  $150 \text{ Kg/cm}^2$ ,  $y_2$  de  $66.65 \text{ MW}$  a  $100 \text{ MW}$ , y el nivel de agua en el colector de caldera  $y_3$  cambia de  $0 \text{ m}$  a  $0.5 \text{ m}$ . Las respuestas del sistema se muestran en la figura 5, donde se puede observar que el controlador en  $PA$  (lazo de control  $LP_1$ ) sigue manteniendo un mejor desempeño para estabilizar el sistema comparado con el controlador en  $PB$  (lazo de control  $LP_2$ ).

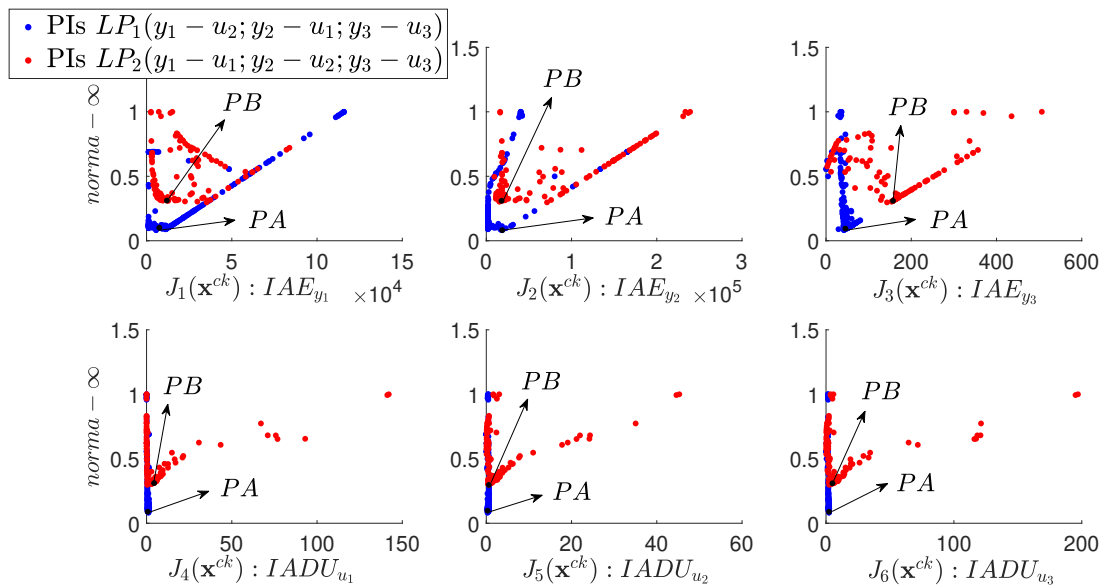


Figura 2: Frentes de Pareto para los lazos  $LP_1$  y  $LP_2$  usando LD con norma- $\infty$ . Los objetivos  $J_1(\mathbf{x}^{ck})$ ,  $J_2(\mathbf{x}^{ck})$ ,  $J_3(\mathbf{x}^{ck})$  evalúan el desempeño de  $y_1, y_2, y_3$  respectivamente.  $J_4(\mathbf{x}^{ck})$ ,  $J_5(\mathbf{x}^{ck})$ ,  $J_6(\mathbf{x}^{ck})$  evalúan los esfuerzos de control  $u_1, u_2, u_3$  respectivamente.

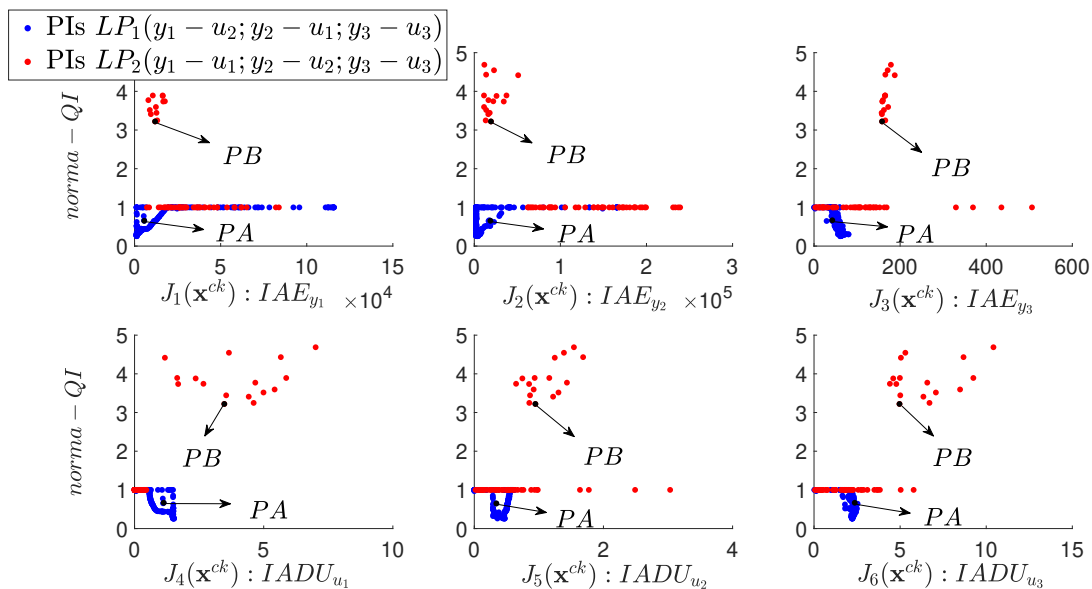


Figura 3: Frentes de Pareto para los lazos  $LP_1$  y  $LP_2$  usando LD con norma- $QI$ . Se grafican solamente las soluciones donde  $QI < 5$ .  $J_1(\mathbf{x}^{ck})$ ,  $J_2(\mathbf{x}^{ck})$ ,  $J_3(\mathbf{x}^{ck})$  evalúan el desempeño de  $y_1, y_2, y_3$  respectivamente.  $J_4(\mathbf{x}^{ck})$ ,  $J_5(\mathbf{x}^{ck})$ ,  $J_6(\mathbf{x}^{ck})$  evalúan los esfuerzos de control  $u_1, u_2, u_3$  respectivamente.

### 5 Conclusiones

En este artículo se muestra un ejemplo de aplicación para controlar de forma descentralizada sistemas multivariables con un enfoque de optimización multiobjetivo. La metodología usada permite tanto la selección de lazos de control como el ajuste óptimo de sus controladores. Se aplicó la metodología a un sistema multivariable no lineal denominado unidad caldera-turbina, para lo

cual se plantearon dos conceptos de diseño ( $LP_1$  y  $LP_2$ ). Se mostró detalladamente que el concepto  $LP_1$  tiene un mejor desempeño para controlar el sistema que el concepto  $LP_2$ . Un aspecto interesante es que la metodología se aplicó directamente sobre el sistema no lineal, es decir no fue necesario linealizarlo. En el ejemplo de aplicación se muestra como la metodología ofrece a un diseñador información detallada para que en base a sus preferencias pueda elegir tanto los lazos de control como

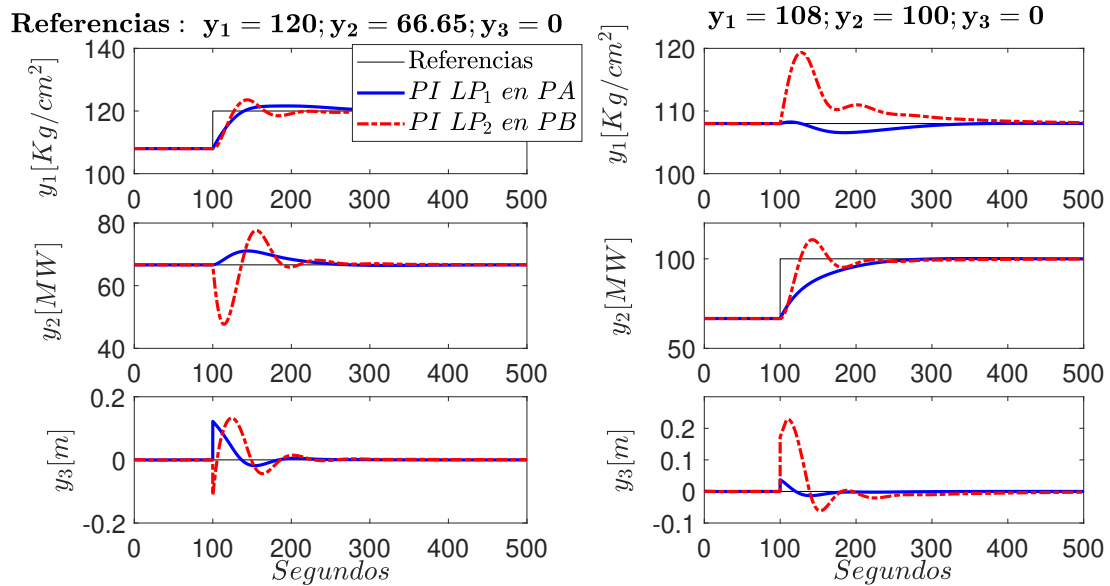


Figura 4: Salidas del sistema para los controladores *PA*, *PB* en un punto de operación cercano al punto de operación nominal de la unidad caldera-turbina.

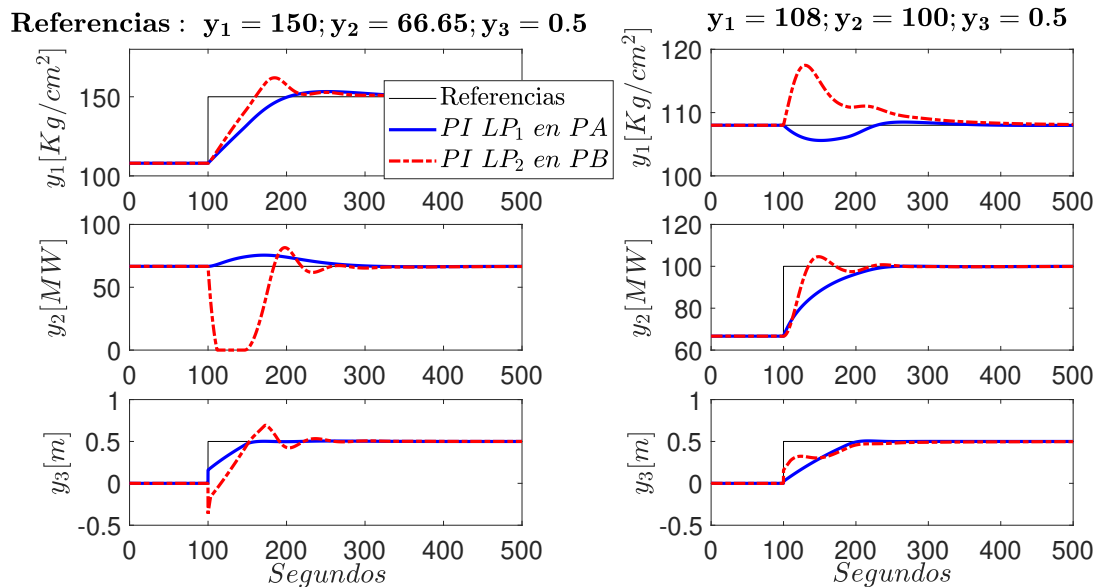


Figura 5: Salidas del sistema para los controladores *PA*, *PB* en un punto de operación alejado del punto nominal de trabajo de la unidad caldera-turbina.

el ajuste óptimo de los controladores del sistema bajo estudio.

**Agradecimientos**

A la Universidad Politécnica Salesiana (Ecuador) y al grupo de investigación en sistemas de control y robótica (GISCOR). Trabajo parcialmente financiado por proyecto RTI2018-096904-B-I00 del plan estatal de I+D+i orientada a los retos de la sociedad, Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades (España) .

**Referencias**

- [1] Karl Johan Åström and Rod Bell. Dynamic models for boiler-turbine alternator units: Data logs and parameter estimation for a 160 mw unit. *Research Reports TFRT-3192*, 1987.
- [2] Lubomir Bakule. Decentralized control: Status and outlook. *Annual Reviews in Control*, 38(1):71–80, 2014.
- [3] Xavier Blasco, Juan M Herrero, Javier Sanchis, and Manuel Martínez. A new graphical

- visualization of n-dimensional pareto front for decision-making in multiobjective optimization. *Information Sciences*, 178(20):3908–3924, 2008.
- [4] Xavier Blasco, Juan Manuel Herrero, Gilberto Reynoso-Meza, and Miguel A Martínez Iranzo. Interactive tool for analyzing multiobjective optimization results with level diagrams. In *Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference Companion*, pages 1689–1696, 2017.
- [5] Edgar Bristol. On a new measure of interaction for multivariable process control. *IEEE transactions on automatic control*, 11(1):133–134, 1966.
- [6] Eduardo F Camacho and Carlos Bordons Alba. *Model predictive control*. Springer science & business media, 2013.
- [7] Pang-Chia Chen and Jeff S Shamma. Gain-scheduled  $\ell_1$ -optimal control for boiler-turbine dynamics with actuator saturation. *Journal of process control*, 14(3):263–277, 2004.
- [8] Juan Garrido, Fernando Morilla, and Francisco Vazquez. Centralized pid control by decoupling of a boiler-turbine unit. In *2009 European Control Conference (ECC)*, pages 4007–4012. IEEE, 2009.
- [9] JM Herrero, Xavier Blasco, M Martínez, C Ramos, and J Sanchis. Non-linear robust identification of a greenhouse model using multi-objective evolutionary algorithms. *Biosystems Engineering*, 98(3):335–346, 2007.
- [10] Víctor Huilcapi, Xavier Blasco, Juan Manuel Herrero, and Gilberto Reynoso-Meza. A loop pairing method for multivariable control systems under a multi-objective optimization approach. *IEEE Access*, 7:81994–82014, 2019.
- [11] Víctor Huilcapi, Xavier Blasco, Juan Manuel Herrero, and Gilberto Reynoso-Meza. A loop pairing method for non-linear multivariable control systems under a multi-objective optimization approach. *IEEE Access*, 8:41262–41281, 2020.
- [12] Victor Huilcapi, Juan Manuel Herrero, Xavier Blasco, and Miguel Martínez-Iranzo. Non-linear identification of a peltier cell model using evolutionary multi-objective optimization. *IFAC-PapersOnLine*, 50(1):4448–4453, 2017.
- [13] Víctor Huilcapi, Byron Lima, Xavier Blasco, and Juan Manuel Herrero. Multi-objective optimization in modeling and control for rotary inverted pendulum. *RIAI-Revista Iberoamericana de Automatica e Informatica Industrial*, pages 363–373, 2018.
- [14] Victor Huilcapi Subia. *Desarrollo de una metodología para la selección de lazos de control en sistemas multivariados mediante técnicas de optimización multiobjetivo*. PhD thesis, Universitat Politècnica de València, 2021.
- [15] Ali Khaki-Sedigh and Bijan Moaveni. *Control configuration selection for multivariable plants*, volume 391. Springer, 2009.
- [16] Štefan Kozák. State-of-the-art in control engineering. *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, 1(1):1–9, 2014.
- [17] Gilberto Reynoso Meza, Xavier Blasco Ferragud, Javier Sanchis Saez, and Juan Manuel Herrero Durá. *Controller tuning with evolutionary multiobjective optimization: A holistic multiobjective optimization design procedure*, volume 85. Springer, 2016.
- [18] Babatunde A Ogunnaike. *Process dynamics, modeling, and control*. Number 660.28 O48. 1994.
- [19] Gilberto Reynoso-Meza, Xavier Blasco, Javier Sanchis, and Juan M Herrero. Comparison of design concepts in multi-criteria decision-making using level diagrams. *Information Sciences*, 221:124–141, 2013.
- [20] Wen Tan, Horacio J Marquez, Tongwen Chen, and Jizhen Liu. Analysis and control of a nonlinear boiler-turbine unit. *Journal of process control*, 15(8):883–891, 2005.
- [21] Gang Tao. Multivariable adaptive control: A survey. *Automatica*, 50(11):2737–2764, 2014.
- [22] Yarai E Tlatelpa-Osorio, H Rodríguez-Cortés, and JÁ Acosta. A decentralized approach for the aerial manipulator trajectory tracking. In *2020 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, pages 504–511. IEEE, 2020.



© 2021 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>).